

## ОБЛАДНАННЯ ТА РЕМОНТИ

УДК 621.873

© Сагіров Ю.Г.\*

### ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SOLID WORKS

В общем виде описана проблема эксплуатации грузоподъемных кранов, дан краткий анализ современных систем автоматизированного проектирования, поставлена задача и выделены проблемы, решение которых является целью данной статьи. Выполнен анализ напряженного состояния с учетом фактического состояния (наличие дефектов, ремонтных наклеек и т.п.) на примере мостового и портального кранов, выводы и перспективы использования изложенного материала.

**Ключевые слова:** мостовой кран, металлоконструкция, пространственная модель, метод конечных элементов, Solid Works, Cosmos Works, долговечность.

**Сагіров Ю.Г. Прочностний аналіз металоконструкцій вантажопідійомних кранів з використанням Solid Works.** У загальному вигляді описана проблема експлуатації вантажопідійомних кранів, наведений короткий аналіз сучасних систем автоматизованого проектування, поставлене завдання та виділені проблеми, вирішення яких є метою даної статті. Виконаний аналіз напруженого стану з урахуванням фактичного стану (наявність дефектів, ремонтних накладок і т.п.) на прикладі мостового та портального кранів, висновки та перспективи використання наведеного матеріалу.

**Ключові слова:** мостовий кран, металоконструкція, просторова модель, метод кінцевих елементів, Solid Works, Cosmos Works, довговічність.

**Yu.G. Sagirov. Strength analysis of metal lifting cranes with application of Solid Works.** Described in the general view was the problem of operation of cranes, a brief analysis of modern computer-aided design, task and highlights the problems the solution of which is the aim of this article. The analysis of the stress state in view of the actual state (presence of defects, repair patches) on the example of a bridge and gantry cranes, conclusions and prospects for the use of the material.

**Keywords:** bridge crane, metal construction, spatial model, method of eventual elements, Solid Works, Cosmos Works, longevity.

**Постановка проблемы.** На сегодняшний день более 90% кранов выработали свой нормативный ресурс. Обновление кранового парка практически не осуществляется и с каждым годом количество эксплуатируемых кранов с истекшим нормативным сроком службы увеличивается. Так как еще в 2002 г. парк грузоподъемных кранов в Украине оценивался на 85-94% с отработанным сроком службы [1, 2], то, доминирующими причинами аварий можно считать нарушения условий их комплексного диагностирования, ремонта, технического обслуживания и эксплуатации. К сожалению, в условиях, которые сложились с парком грузоподъемных кранов после реструктуризации предприятий и организаций, уровень диагностирования и ремонта не высок. Не всегда вовремя производится ремонт крановых узлов, деталей и металлоконструкций. Риск аварийности среди этих кранов в процессе эксплуатации весьма велик. Совершенствование методов расчета крановых металлоконструкций – важная научно-техническая задача, решение которой позволит повысить безопасность эксплуатации грузоподъемных кранов, а также их надежность.

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

**Анализ последних исследований и публикаций.** Современным направлением при проектировании и анализе напряженно-деформированного состояния металлоконструкции грузоподъемных кранов, корпусных деталей и элементов передач является использование систем автоматизированного проектирования (САПР), метода конечных элементов (МКЭ), методов вычислительного эксперимента и имитационного моделирования нагруженности.

**Цель статьи** – на примере мостового и порталного кранов, эксплуатируемых на промышленных предприятиях г. Мариуполь, разработать уточненный метод анализа напряженно-деформированного состояния металлоконструкции.

**Изложение основного материала.** В процессе эксплуатации грузоподъемных кранов выявляются неоднократные случаи образования трещин в основном металле, разрывов сварных швов в местах крепления ребер жесткости. Ремонт дефектных участков не всегда дает эффективные результаты, трещины появляются вновь. Изучение технической документации позволило выявить, что в некоторых случаях напряженно-деформированное состояние элементов металлоконструкции при проектировании определялось не точно, приближенным методом. При ремонте использование стандартных инженерных методик расчета металлоконструкции не всегда является возможным из-за наличия тех или иных ограничивающих факторов, особенностей конструкции, состояния металлоконструкции. В связи с этим и возникает необходимость создания решения, которое будет подходящим именно для конкретной сложившейся ситуации. Для перехода от идеи предложенного решения, результатом которой является эскиз будущего измененного узла, к созданию чертежей конструктору необходимо определиться с необходимостью усиления элементов существующей конструкции, произвести расчет усиления и, при необходимости, новых узлов, выполнить проверочные расчеты для реконструированной машины в целом (устойчивость, прочность, усталость и т. д.). На следующем этапе информация о результатах расчета (типы и места выполнения усиления, толщины металла, форма элементов и т. д.) передается для создания чертежной проектной документации.

Таким образом, вышеописанные действия являются базовыми при выполнении ремонта, модернизации, реконструкции подъемно-транспортной техники.

Традиционные расчеты на прочность крановых металлоконструкций основаны на предположении плоской схемы их работы, тогда как их элементы работают как пространственные системы. Например, расчет моста крана с двумя пролетными балками листовой конструкции обычно заключается в расчете отдельных балок с приложенными расчетными нагрузками. Таким же образом рассчитываются и ферменные конструкции кранов. Данный подход традиционно обусловлен тем, что методы расчета развивались, опираясь на ручной способ вычисления с применением простых счетных устройств и приспособлений. В сложных случаях трудно оценить точность таких расчетов без экспериментальной проверки на моделях и изделиях.

В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники, в том числе в связи с разработкой специальных программ для расчета пространственных конструкций, постепенно исчезает необходимость в разбивке на плоские элементы и вообще в расчете изолированных крупных узлов металлоконструкций. Практически все современные расчеты на прочность проводят, используя метод конечных элементов. Компьютеры позволяют выполнять такие расчеты при помощи приближенных численных методов. Метод конечных элементов является одним из них. В последние десятилетия он занял ведущее положение и получил широкое применение.

Для определения фактического напряженно-деформированного состояния металлоконструкции и последующего усиления предложен уточненный метод расчета несущих металлоконструкций мостового кранов и башенных колонн порталных кранов. Вначале разрабатывается расчетная схема, с учетом действующих нагрузок и их сочетаний. Затем, с использованием САПР, разрабатывается компьютерная пространственная твердотельно-деформируемая модель.

Последовательность построения трехмерной модели может быть разной. Например, сначала строится 3D вид, а затем автоматически генерируются 2D виды. Некоторые системы способны преобразовывать сборочные чертежи механизма ортогональной проекции в 3d вид этого изделия в разобранном состоянии. В некоторых системах 3D имеются средства автоматического анализа физических характеристик, таких как вес, моменты инерции и средства решения геометрических проблем сложных сопряжений и интерпретации. Поскольку в 3D системах существует автоматическая связь между данными различных геометрических видов изображения, 3D моделирование полезно в тех приложениях, где требуется многократное редактирование 3D

образа на всех этапах процесса проектирования.

Методы трехмерного моделирования делятся на 3 вида:

1. Каркасное (проволочное) моделирование;
2. Поверхностное (полигональное) моделирование;
3. Твёрдотельное (сплошное, объемное) моделирование.

Ввиду ряда преимуществ, а именно:

- полное определение объемной формы с возможностью разграничивать внутренний и внешние области объекта, что необходимо для взаимовлияний компонент;
- обеспечение автоматического удаления скрытых линий;
- автоматическое построение 3D разрезов компонентов, что особенно важно при анализе сложных сборочных изделий;
- применение методов анализа с автоматическим получением изображения точных массовых характеристик методом конечных элементов;
- получение тоновых эффектов, манипуляции с источниками света;
- методы создания трехмерных твердотельных моделей подразделяются на два класса:
- метод конструктивного представления (C-Rep);
- метод граничного представления (B-Rep).

Для решения поставленных задач предлагается использовать твердотельное моделирование. Твердотельная модель описывается в терминах того трехмерного объема, который занимает определяемое ею тело. Твердотельное моделирование является самым совершенным и самым достоверным методом создания копии реального объекта. Традиционно, продукты САПР для машиностроения разделены на три класса: тяжелый, средний и легкий. Такая классификация сложилась исторически, и хотя уже давно идут разговоры о том, что грани между классами вот-вот сотрутся, они остаются, так как системы по-прежнему различаются и по цене, и по функциональным возможностям. В результате сейчас в этой области имеется несколько мощных систем, стабильно развивающиеся продукты среднего класса и получившие массовое распространение недорогие «легкие» программы. Имеется и так называемые «внеклассовые» САПР, роль которой выполнять различные специализированные задачи, например, такие как расчеты коробок передач и редукторов.

К легким САПР можно отнести AutoCad – самая популярная в мире среда автоматизированного проектирования, избранная многими разработчиками в качестве базовой графической платформы для создания машиностроительных, архитектурных, строительных, геодезических программ и систем инженерного анализа.

Система КОМПАС-3D – позволяет реализовать классический процесс трехмерного параметрического проектирования – от идеи к ассоциативной объемной модели, от модели к конструкторской документации.

ZwCAD – выбор для архитекторов, инженеров, строителей и других специалистов, работающих в CAD системах, для которых важно соответствие стандартам, простота и привычность интерфейса AutoCAD, стандартный набор необходимых инструментов в рамках разумного бюджета.

Bricscad – один из лидеров среди альтернативных DWG САПР платформ, предлагает полный набор функций для профессиональных пользователей. Bricscad использует формат DWG и обеспечивает полную совместимость с AutoCAD.

Progecad 2009 Professional записывает и читает формат DWG от версии AutoCAD 2.5 до версии 2009.

Среди САПР, относящихся к легким, можно назвать GstarCad, Infracad, BtoCAD, AutoCAD Inventor Suite.

К средним САПР относится ADEM – программное обеспечение для промышленности и образования. ADEM предназначена для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства. Компания «Топ Системы» предлагает полностью интегрированные программные решения T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM для электронного документооборота (PDM), системы автоматизации проектирования (САПР), подготовки производства и управленческой деятельности на предприятии, подготовки программ для станков с ЧПУ.

SolidWorks – мощное средство проектирования, базирующееся на передовых технологиях гибридного параметрического моделирования, интегрированных средствах электронного доку-

ментооборота SWR-PDM/Workflow и широком спектре специализированных модулей.

Разработчиком SolidWorks является SolidWorks Corp. (США), независимое подразделение холдинга Dassault Systemes (Франция) - мирового лидера в области высокотехнологичного программного обеспечения.

Концептуальные идеи, положенные разработчиками в основу SolidWorks, и такие качества, как высокая производительность и надежность, интуитивно понятный интерфейс, русификация и поддержка ЕСКД, предопределяют успех внедрения SolidWorks на промышленных предприятиях.

Тяжелые САПР. CATIA V5 – CAD/CAM/CAE – система для описания изделия и его моделирования на разных этапах жизненного цикла. Разработана в 1998 году на основе ядра CNEXT, содержащего средства, как для описания геометрии изделия, так и для описания процессов его создания, с возможностью сохранять и накапливать используемые при этом приемы и методы в виде корпоративных знаний.

Pro/Engineer полнофункциональная САПР для разработки изделий любой сложности. Благодаря мощным возможностям автоматизации всех машиностроительных дисциплин, Pro/ENGINEER является общепризнанным 3D решением для моделирования и разработки конкурентоспособных коммерческих изделий.

CAD/CAE/CAM Unigraphics – система высокого уровня, предназначенная для решения всего комплекса задач, стоящих перед инженерами на всех этапах создания сложных технических изделий (предварительное проектирование, этап инженерного анализа и оптимизации конструкции, изготовление). По всему миру Unigraphics широко используется в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, общем машиностроении, производстве бытовой техники, игрушек, медицинских инструментов.

Studio for Design - это возможность быстрого и точного отображения различных вариантов, не ограничивающая свободы действий дизайнера, это соединение промышленного дизайна и современных средств инженерного анализа в одном интегрированном пакете. Такое решение снимает вопросы совместимости и потери данных, не требует обучать будущих пользователей множеству прикладных программ.

В данной работе уточненный метод анализа напряженно-деформированного состояния металлоконструкции предлагается выполнять с использованием возможностей SolidWorks на примере портального и мостового кранов.

Для определения фактического напряженно-деформированного состояния колонны и, в последующем, усиления был предложен уточненный метод расчета башенных колонн порталных кранов с ОПУ. В начале разрабатывается расчетная схема (рис. 1), с учетом действующих нагрузок и их сочетаний [1, табл. 6.1].

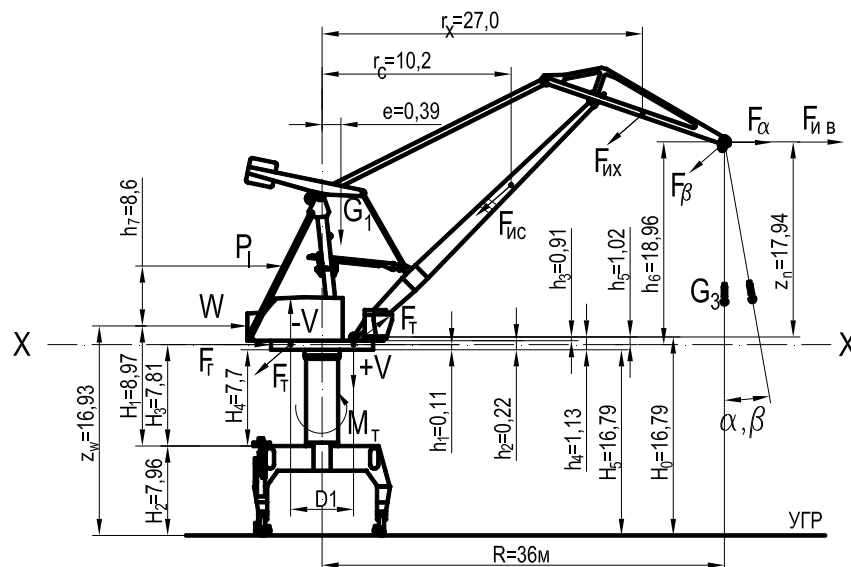


Рис. 1 – Расчетная схема портального крана

Для этого все внешние нагрузки, действующие на кран, преобразовываются и приводятся к нагрузкам, равнозначным по воздействию на элементы конструкции колонны. Эти нагрузки можно разделить на три вида:

1. Нагрузки, действующие в вертикальной плоскости и воздействующие на колонну через тела качения ОПУ. Все вертикальные нагрузки на тела качения ОПУ распределяются неравномерно (рис. 2).

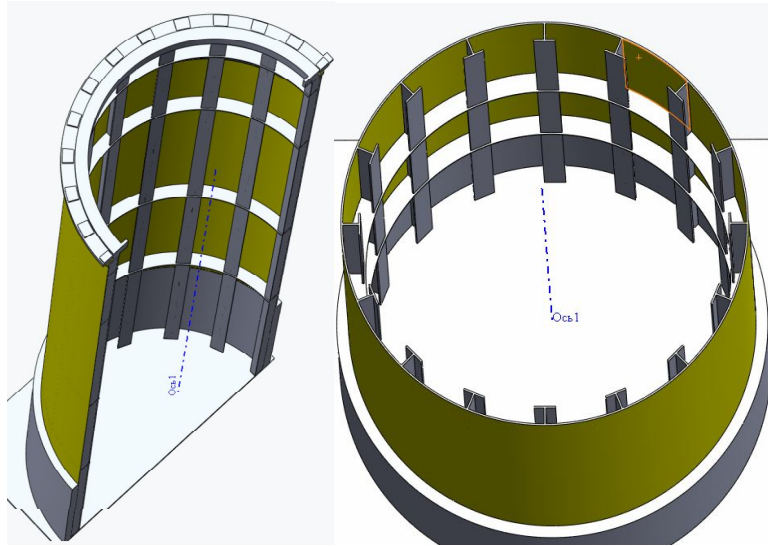


Рис. 2 – Модель колонны

2. Нагрузки, действующие в плоскости качения стрелы и вызывающие изгиб колонны в этой плоскости. Такими нагрузками являются (рис. 1):

- горизонтальная сила от отклонения канатов:

$$F_{\alpha} = G_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha . \quad (1)$$

- сила инерции стреловой системы при изменении вылета стрелы:

$$F_{IB} = \frac{m_c \cdot V}{t} , \quad (2)$$

где  $m_c$  – приведенная к блокам хобота масса стреловой системы,

$V$  – мгновенная скорость оголовка хобота,

$t$  – время разгона (торможения) механизма изменения вылета.

- горизонтальная сила давления ветра.

Действие этих нагрузок приведено к горизонтальной равнодействующей силе  $P_1$  (рис. 1), вызывающей изгиб колонны в плоскости качения стрелы.

3. Нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости и вызывающие кручение колонны вокруг ее вертикальной оси. Кручение колонны вокруг ее вертикальной оси вызывается окружными силами торможения  $F_T$  (рис. 1) при торможении двух механизмов вращения колонны.

Затем разрабатывается компьютерная твердотельно-деформируемая модель колонны (рис. 2). Геометрические параметры модели (геометрическое подобие) полностью соответствуют натурному образцу колонны. Вариант нагружения крана и комбинации нагрузок (рис. 3) принимаются в соответствии с нормами расчета металлоконструкций порталных кранов [2, с. 48].

Для каждого режима нагружения крана (подъем груза; подъем груза и поворот; подъем груза, поворот и изменение вылета и т.д.) и соответствующих значений действующих нагрузок

определяется напряженно-деформированное состояние колонны с использованием САПР SolidWorks, CosmosWorks [3].

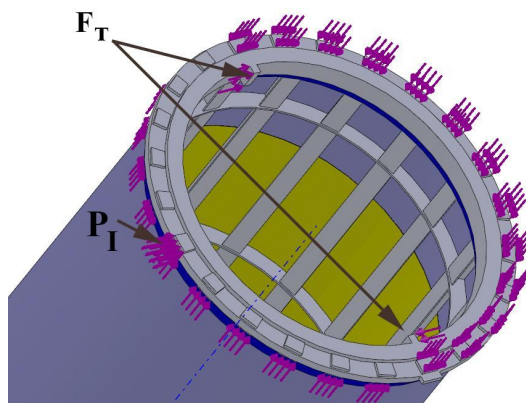


Рис. 3 – Участки приложения сил к модели

Результаты исследования каждого варианта нагружения выдаются в виде:

1. Эпюр распределения коэффициента запаса прочности (рис. 4);
2. Эпюр эквивалентных напряжений в цилиндрической оболочке колонны (рис. 5), в скрытых участках (элементы обрешетки) колонны и в кольцевых диафрагмах (рис. 6).

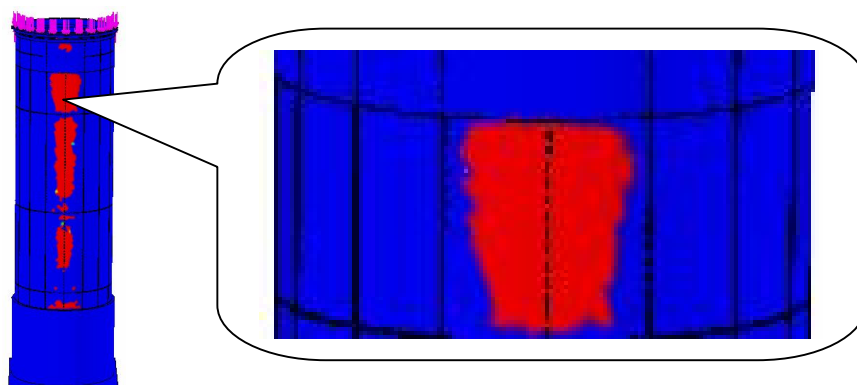


Рис. 4 – Эпюра распределения коэффициента запаса прочности

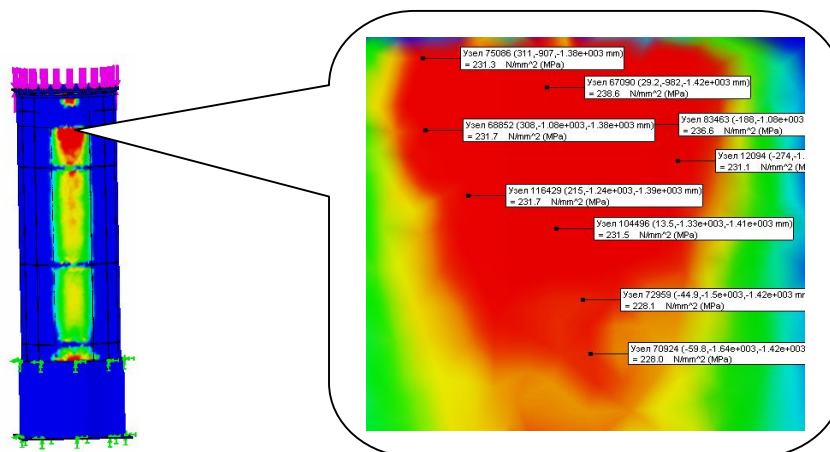


Рис. 5 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений



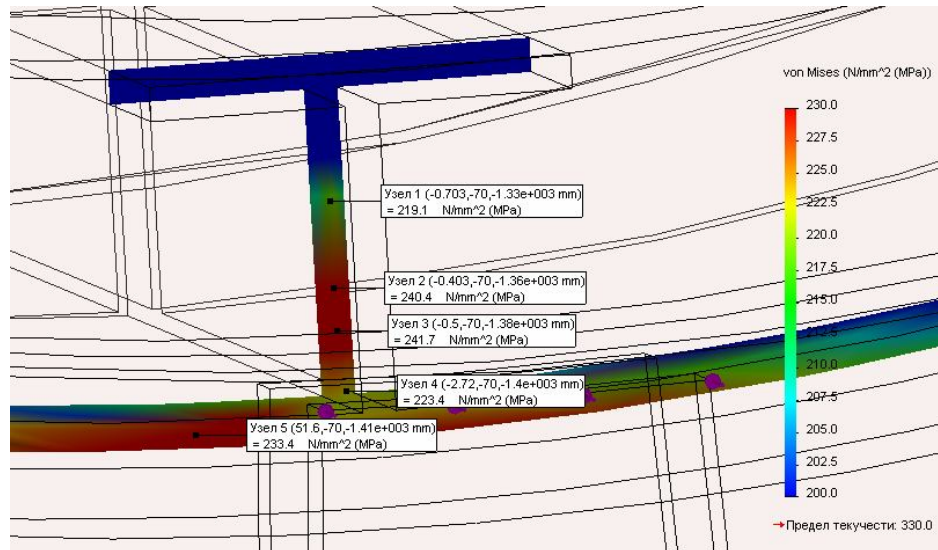


Рис. 6 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений в скрытых участках

Для определения фактического напряжено-деформированного состояния металлоконструкции мостового крана последовательность действий аналогична, как и для колонны portalного крана. Разрабатывается расчетная схема и модель (рис. 7).

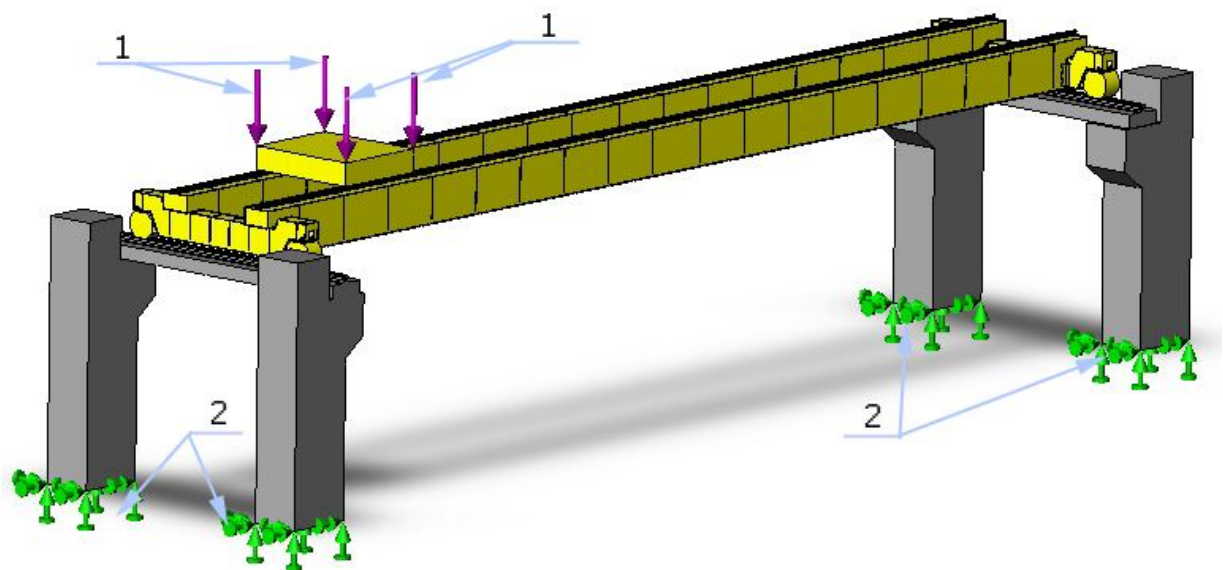


Рис. 7 – Модель мостового крана: 1 - места приложения нагрузки; 2 - места за-крепления

При моделировании нагружения металлоконструкции крана нагрузка прикладывалась к тележке, кран опирался на рельсовый путь, закрепление осуществлялось за основания колонн.

С использованием инструментов COSMOS Works, построены эпюры распределения коэффициента запаса прочности (рис. 8) и распределения напряжений в модели (рис. 9).

Также, для более детального анализа нагруженного состояния отдельных участков металлоконструкций крана, рассмотрены сечения, на которых можно проследить распределении напряжений в скрытых участках металлоконструкции крана: внутренние полости коробчатых балок, ребра жесткости.

При проведении анализа повреждений металлоконструкции крана, большое внимание уделялось наиболее нагруженным участкам и участкам, имеющим минимальные коэффициен-

ты запаса прочности по результатам моделирования, а именно – места крепления ходовых колес крана, места соединения главных и концевых балок.

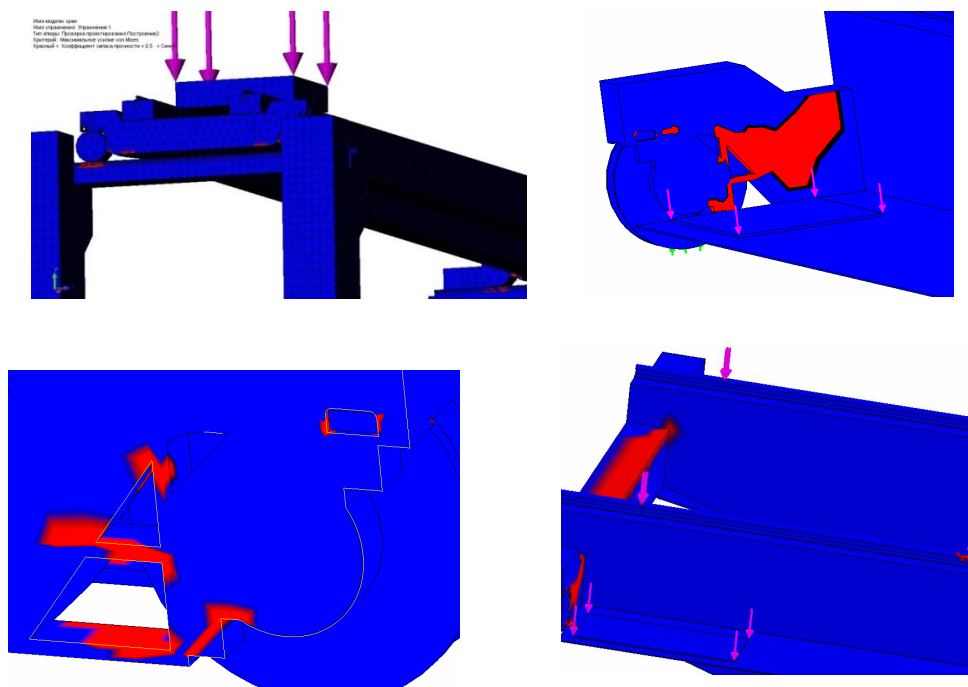


Рис. 8 – Распределение значений коэффициента запаса прочности в модели

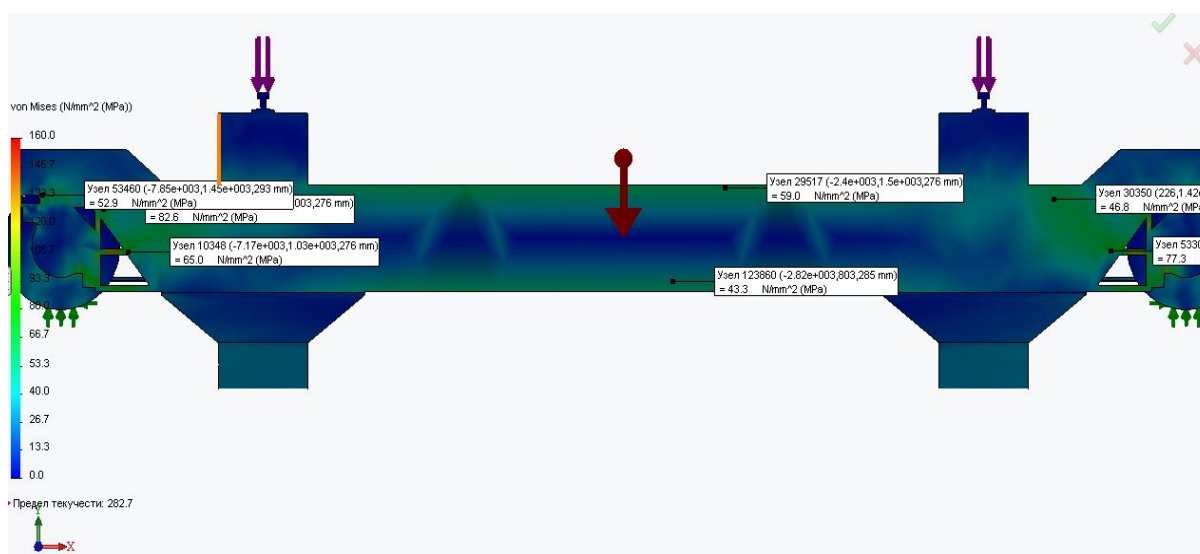


Рис. 9 – Определение напряжений в модели

В результате установлено, что наиболее нагруженными участками являются: опорная часть крана и узел сопряжения главной и торцевой балок. Это наглядно видно на эпюре распределения коэффициента запаса прочности (рис. 8): красным цветом выделены наиболее нагруженные участки.

На следующем этапе моделирования были рассмотрены модели с трещинами в стенках характерных участков конструкции и определены напряжения с их учетом (рис. 10). Установлено, что наличие трещин привело к увеличению напряжений в опорной части крана с 77 МПа до 745 МПа. Значения напряжений в других точках также увеличились (рис. 10).

В местах образования трещин на кране выполнена установка ремонтных накладок, которая также была смоделирована с последующим определением напряжений. Построенные эпюры (рис. 11) позволяют утверждать, что после установки накладок значения напряжений



уменьшилось, как со стороны трещин (внешняя сторона торцевой балки), так и с внутренней стороны. Например, у узла 9145 напряжения уменьшились с 101,7 МПа до 64,8 МПа.

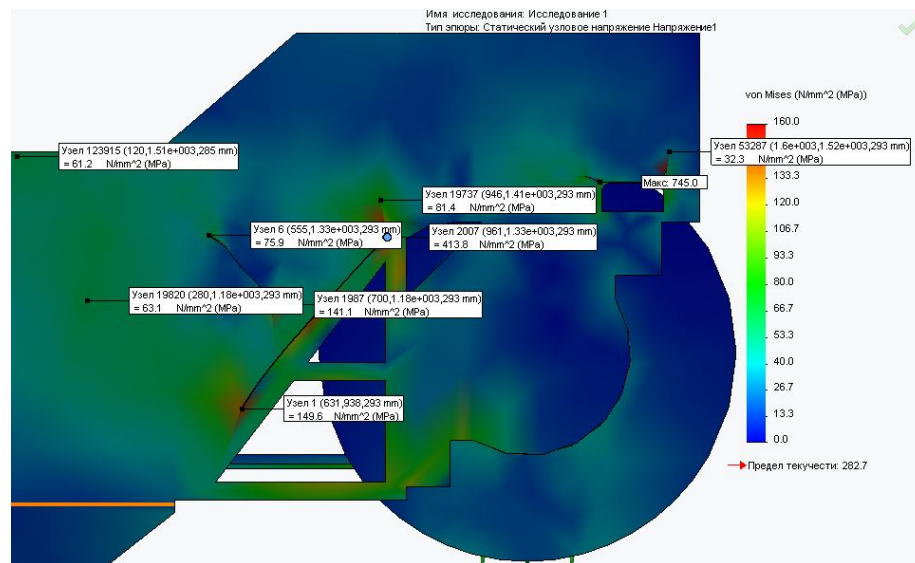


Рис. 10 – Напряжения в модели после «появления» трещин

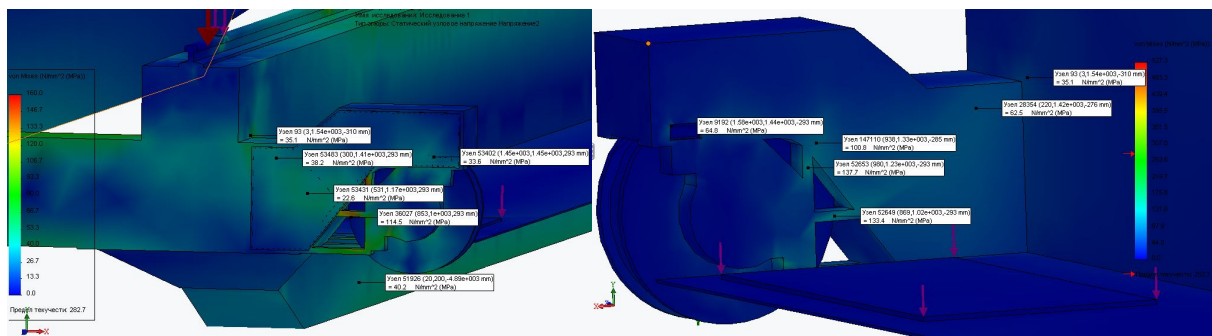


Рис. 11 – Напряжения в модели после установки накладок

### Выводы:

1. Предложен уточненный метод анализа напряженно-деформированного состояния металлоконструкции грузоподъемных кранов.
2. Определено напряженное состояние элементов конструкции крана, построены эпюры распределения коэффициента запаса прочности.
3. С использованием моделей выполнен анализ напряженного состояния металлоконструкции крана в опасных сечениях до и после установки ремонтных накладок.
4. Полученные результаты анализа использованы в практических рекомендациях по усилению колонны крана «Азовец».
5. Предложенный метод может быть использован при расчетах башенных цилиндрических колонн, металлоконструкции мостовых кранов других машин и сооружений.

### Список использованных источников:

1. Петухов П.З. Специальные краны: учебное пособие для машиностроительных ВУЗов / П.З. Петухов, Г.П. Ксюнин, Л.Г. Серлин. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
2. Брауде В.И. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 1 / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.
3. Алямовский А.А. Solid Works/ Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов. – СПб.: БВХ-Петербург. – 2005. – 800 с.

**Bibliography:**

1. Petukhov P.Z. Special cranes: a textbook for engineering universities / P.Z. Petukhov, G.P. Ksyunin, L.G. Serlin. - Mashinostroenie, 1985. – 248 p.
2. Braude V.I. Reference cranes, in 2 vols 1 / V.I. Braude, M.M. Hochberg, I.E. Zvyagin. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – 536 p.
3. Alyamovsky A.A. Solid Works / Computer modeling in engineering / A.A. Alyamovsky, A.A. Sobachkin, E.V. Odintsov. – SPb.: Petersburg. – 2005. – 800 p.

Рецензент: А.А. Ищенко  
д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 05.04.2013